

TEIGENVALUE PROBLEMS IN STABILITY OF INDUSTRIAL STEEL BUILDING WITH A HANDLING SYSTEM

Abstract

The paper presents the eigenvalue problems of the stability of industrial steel buildings with a handling system. The aim of the calculations was to determine eigenvalues (critical forces) and corresponding eigenvectors for the building structure adapted to a crane operation. The FEM analysis was performed using Robot software. The impact of discretisation on the values of critical forces obtained was also examined.

Keywords: industrial steel buildings, handling system, eigenvalue problem, stability

1. Introduction

Steel buildings are typical industrial structures. Those can be built relatively quickly and construction costs are lower compared with masonry structures. Excellent strength properties of steel, which allow large spans without additional internal columns, possibility of structure extension or conversion make those an attractive option, increasingly frequently selected by investors in Poland. Additionally, such structures have some aesthetic value, and also they can be recycled, which fits in well with sustainability policy.

Generally, a steel building can be defined as follows. It is a single-storey (most often slab-on grade), single or multi-bay building, which does not have partitions (dividing walls), either longitudinal or transverse, inside (Fig. 1). External walls and the roof form the building envelope enclosing the useful floor space, and they also withstand environmental loads. By providing stiffness, they have an important role to play in the structural performance of the building. The design of steel building structure makes it stable and protects it from external climate.

Although such structures offer many advantages, failures and even collapses (Katowice, 2006) may also occur. Therefore, it is important those structures are properly designed and erected.

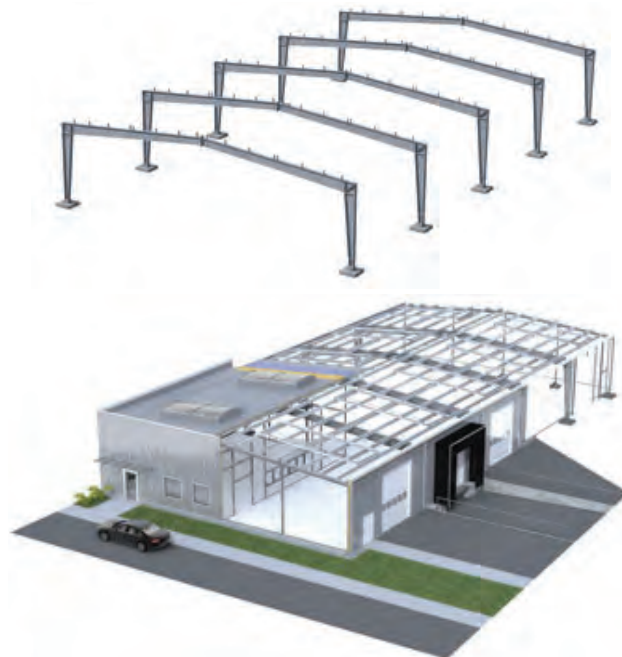


Fig. 1. Industrial steel building [1]

2. Industrial buildings with handling systems

Single-storey buildings can have multiple uses. Those include industrial steel buildings (production sites and warehouses), logistics facilities (hangars, depots, service stations), commercial buildings (retail outlets and shops, exhibition centres, sports halls, concert halls, railway stations, etc).

Industrial buildings are the most commonly found steel structures. They provide large, open floor areas and freedom for activities that involve manufacturing, and also sale, storage, and sorting of different products. The buildings are usually rectangular in plan and have structural pattern composed of flat, repeatedly arranged framing members with transverse bracing. Additionally, those may contain components related to the intra-facility handling system, such as girders of overhead travelling cranes or track cranes, auxiliary structures such as mezzanines or entresols.

Cranes are needed to lift and lower materials and workers, thus facilitating human labour (Fig. 2). Cranes can be of almost the same length as the building itself. Those machines operate vertically and horizontally. Their operation is limited by the length of the runway, distance over which materials can be hoisted or lowered, and the width of bridge. Nowadays, it would not be possible for manufacturing or storage facilities to operate without crane handling systems. That particularly refers to heavy industry, in which handled components are bulky and heavyweight. Therefore, cranes are popular and widely used to handle items inside industrial steel buildings.



Fig. 2. Industrial steel building with a handling system [2]

3. Structure of steel building – key role of stability

In the structural system of each steel building, the principal load-bearing system and ancillary structures for wall cladding and the roof can be distinguished. The primary steel frame of the building consists of transversely arranged portal frames, connected and braced. The role of the frame is to provide strength and stability, and also stiffness necessary for the structure to ensure safe service of the building. The load-bearing frames comprise solid or latticed rafters and columns, also solid or latticed, which support the

former. Each load-bearing structure of the building has to satisfy the condition of the system geometric invariability in the three-dimensional space. The loads acting on the steel building include vertical loads (from the dead load, cranes, snow), and also horizontal ones and those parallel and perpendicular to the structure longitudinal axis. The load-bearing system supports multi-directional loads applied to the structure.

Stability is the fundamental issue related to the steel building structural system. Stability must be ensured at the erection or service stage, and also when the building is extended, refurbished or disassembled [3]. Structural stability involves the capability of the structure to maintain unchanged position and shape under loads acting on it. As regards steel buildings, stability is of crucial importance because of the slenderness of the load-bearing members, i.e. compressed columns. Structures are exposed to a hazard of a sudden occurrence of stability loss when they are subjected to massive compressive loads. The stability loss is manifested as buckling of the structure, e.g. of a column. To put that in simple words, the member starts suddenly deflecting in all directions although lateral forces, even small ones, do not act on it. To ensure appropriate and safe operation of the structure, i.e. its being in the state of static equilibrium, the value of equilibrium (critical load) and eigenvectors (buckling modes) must be determined.

4. Eigenvalue problems in the stability of industrial steel building with a handling system

The stability analysis was performed for an industrial steel building, the cross-section of which is presented in Figure 3, and axonometric projection in Figure 4.

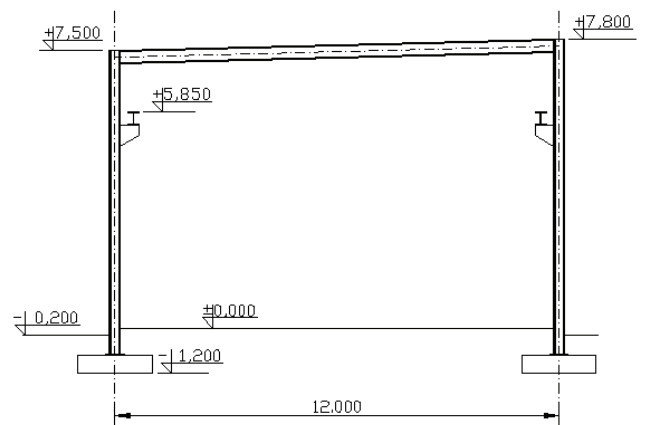


Fig. 3. Cross-section of the industrial steel building with a handling system [6]

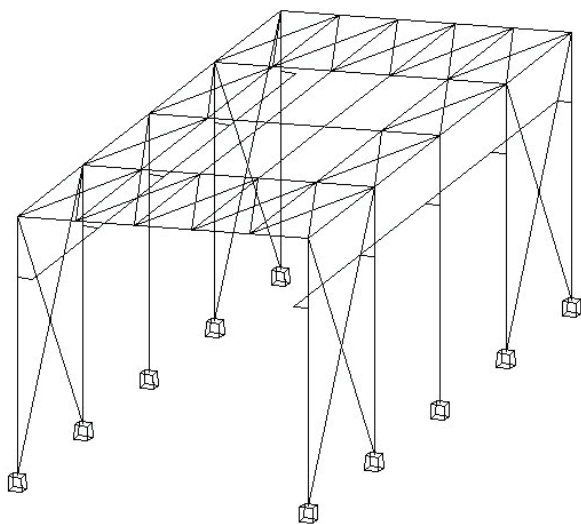


Fig. 4. Axonometric drawing of the building structure [6]

The building of concern has steel structure and it sits on reinforced concrete pad foundations. The building is located in Kielce, in the wind load zone I, and in the snow load zone III. Sandy clays having the degree of plasticity of $IL = 0.2$ form a soil stratum at the foundation level. The depth of foundation was assumed to be 1m below the ground level.

The principal structural component of the building consists in a flat steel frame, which is single-bay, single-storey, with a single-sloped roof and with short brackets supporting crane girders. Column to foundations connection was fully restrained, whereas hinge joints were used to connect roof girts to columns. The axial span is 12 m, and the roof apex is at 7.8 m. The portal frame rafter is solid IPE 400 section, whereas column is solid HEB 320 section. Crane girder is supported by short steel bracket, rigidly connected to the steel column shank. The steel bracket is a plate girder element having variable height.

The short bracket is fillet welded to the column shank and the node is additionally strengthened with ribs. The roof grit is bolted to the column.

Spatial arrangement of the building is created by five portal frames spaced 6 m apart. The building roof cladding is made from troughed sheet which is supported by IPE 200 steel purlins spaced 2.4 m apart. In the roof plane, the end panels contain bracing made from 20 mm diameter steel bars. All components of the roof structure are bolted together, and the troughed sheet roof cladding is installed using self-drilling screws.

Side walls and end walls are made from double skin panels fixed to steel side rails. In the end panels, wall

bracings, made from 80 x 80 x 6 equal leg angle, are installed.

Solid crane girder is made from HEA300 section. The crane runways are secured with end caps with buffer. ZXJ overhead crane installed in the building, with a capacity of 50 kN, travels at the speed of 40 m/min. The trolley travel speed is 30 m/min, and the hoisting speed is 12.5 m/min.

All structural components were made from S235JR steel grade, pad foundations from C30/37 class concrete with RB500W steel reinforcement.

4.1. Core of the issue – eigenvalue problems in structure stability

The lowest value of the load that corresponds to stability loss is termed critical load. The value of it depends on the structural form of the member, e.g. its length, shape, dimensions of the cross-section, manner of support, therefore it is called eigenvalue. Buckling mode, i.e. the deformation of the structure under the critical load is represented by eigenvector. The term eigenvalue problem is understood to include the determination of eigenvalues and corresponding vectors.

In the study, the problem was solved using FEM. Eigenvalues σ_* were determined using equation (1), which expresses the critical equilibrium state of the system under analysis [5]:

$$\det(K - K_G) = 0 \quad (1)$$

where: K – linear stiffness matrix of the structure, K_G – geometric stiffness matrix of the structure.

Eigenvectors $\delta\sigma_*$ were determined from equation (2), which indicates that in the critical state of the system, different positions of its equilibrium are possible:

$$[K - K_G(\sigma_*)] \delta\sigma_* = 0 \quad (2)$$

where: $\delta\sigma_*$ – eigenvector (specifying new, possible system position in the critical equilibrium state),

$$\delta\sigma_* = \{\delta\sigma_{*1}, \delta\sigma_{*2}, \dots, \delta\sigma_{*n}\} \quad (3)$$

Eigenvector expressed by equation (3) gives the mode of the system stability loss.

4.2. Eigenvalue problem in the stability of industrial steel building with a handling system – analysis

The stability analysis for the building of concern was performed using Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014 software, based on FEM. The transverse structural arrangement of the building

is shown in Figure 5. In the other direction, individual transverse units were connected by means of bracings, purlins and the crane girder.

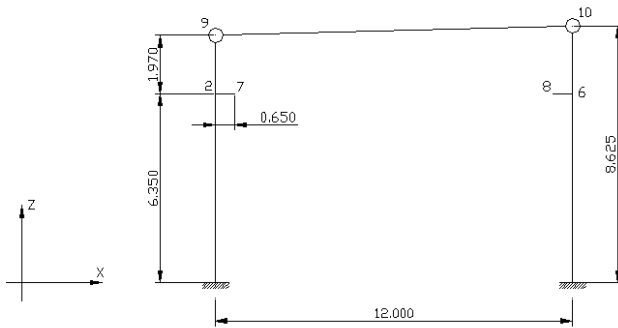


Fig. 5. Structural arrangement of the building model

The analysis was performed using Robot “Buckling Analysis” software. Columns were loaded by a unit force, computation results produced, among others, a pre-set load multiplier. It is equivalent to the critical force given in kN. Columns were modelled using a different number of finite elements, namely one, three and five. In this way, it was possible to analyse variation in results depending on the degree of discretisation of compressed members.

The table and figures below present the results of computations of the critical force, and also buckling modes and eigenvectors for the first four eigenvalues. The dependence of the successive values of critical forces on the degree of discretisation of columns is shown in Table 1.

Table 1. Critical force dependence on the degree of discretisation of columns

Force number	Critical force [kN] 1 element	Critical force [kN] 3 elements	Critical force [kN] 5 elements
1	2172	2167	2167
2	5933	5879	5878
3	7261	6934	6918
4	7870	7392	7373

The results above indicate that with an increase in the number of finite elements, into which the column was divided, the values of individual critical forces approach the exact (precise) value. For that reason, buckling modes were shown for the column division into five finite elements. Those buckling modes are presented in Figures 6 to 9. For the first critical force value, the most interesting for the design engineer, the tilt mechanism of the buckling mode is observed.

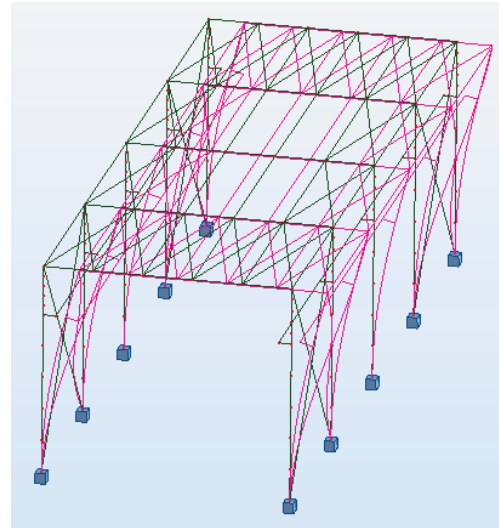


Fig. 6. Buckling mode for critical force 1

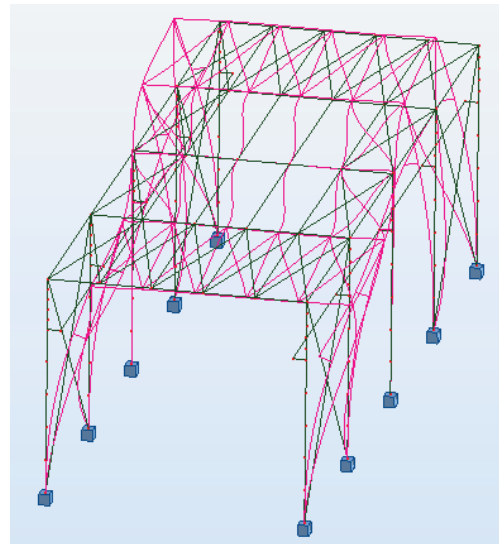


Fig. 7. Buckling mode for critical force 2

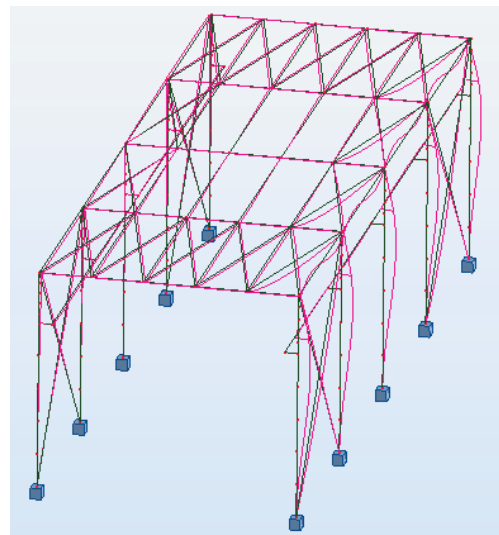


Fig. 8. Buckling mode for critical force 3

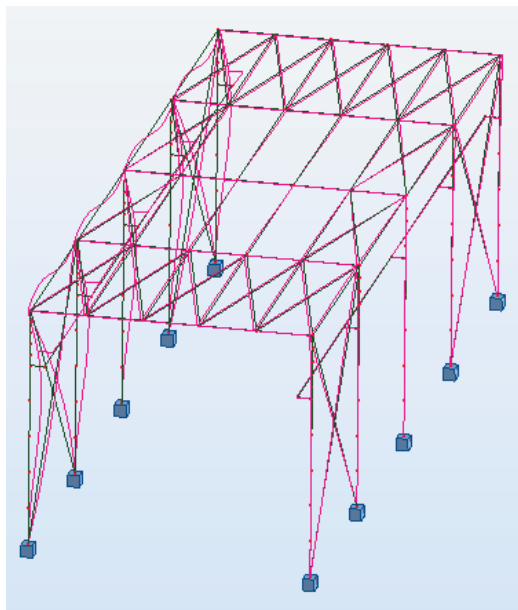


Fig. 9. Buckling mode for critical force 4

For buckling modes presented in Tables 2-5, values of nodal displacements corresponding to eigenvectors were given. Linear displacements UX and UZ were expressed in centimetres, and the angle of rotation RY of the node was measured in radians. Numbers of nodes and the arrangement of the axes were adopted as in Figure 5.

Table 2. Displacement values – eigenvector for critical force 1

Node	Case	Form	Eigenvector UX	Eigenvector UZ	Eigenvector RY
2	3	1	0.01702551	-0.00000106	0.00457266
6	3	1	0.01596688	0.00000100	0.00434994
7	3	1	0.01702552	-0.00228739	0.00457265
8	3	1	0.01596688	0.00217596	0.00434993
9	3	1	0.02659905	-0.00000139	0.00489209
10	3	1	0.02657054	0.00000135	0.00473988

Table 3. Displacement values – eigenvector for critical force 2

Node	Case	Form	Eigenvector UX	Eigenvector UZ	Eigenvector RY
2	3	2	0.01883840	-0.00007905	0.005884638
6	3	2	0.01734691	0.00008146	0.00555568
7	3	2	0.01883912	-0.00300322	0.00585002
8	3	2	0.01734758	0.00286021	0.00555905
9	3	2	0.03142206	-0.00010319	0.00655243
10	3	2	0.03139164	0.00011006	0.00642742

Table 4. Displacement values – eigenvector for critical force 3

Node	Case	Form	Eigenvector UX	Eigenvector UZ	Eigenvector RY
2	3	3	-0.00172898	0.00001100	-0.00056889
6	3	3	-0.00164279	0.00002474	-0.00052136
7	3	3	-0.00172907	0.00029558	-0.00056936
8	3	3	-0.00164288	-0.00023583	-0.00052142
9	3	3	-0.00296590	0.00001436	-0.00064800
10	3	3	-0.00295654	0.00003309	-0.00060105

Table 5. Displacement values – eigenvector for critical force 4

Node	Case	Form	Eigenvector UX	Eigenvector UZ	Eigenvector RY
2	3	4	-0.00133757	-0.00002853	-0.00041083
6	3	4	-0.00117016	-0.00000776	-0.00041001
7	3	4	-0.00133767	0.00017675	-0.00041082
8	3	4	-0.00117023	-0.00021285	-0.00041034
9	3	4	-0.00221857	-0.00003689	-0.00045871
10	3	4	-0.00222515	-0.00001050	-0.00048773

5. Conclusions

The analysis conducted for the study shows that for a specific transverse structure of the steel building with a handling system, the tilt mechanism is decisive for stability loss. The degree of discretisation affects the values of the critical force obtained, additionally this impact is particularly manifested for the second and successive values of critical forces. Then, a relatively low value of the first critical force (2167 kN) justifies the statement that stability issues are of key importance in the design of the transverse system of the steel building with a handling system. The load-bearing structure of the steel building in service should not be overloaded, especially in crane lifting operations, due to loads greater than specified safe working load.

References

- [1] <http://halbud.com.pl>
- [2] www.demagcranes.pl
- [3] Biegus A.: *Steel buildings* (in Polish), Arkady, Warszawa 2010.
- [4] <http://www.konstrukcjeinzynierskie.pl>
- [5] Gomuliński A., Witkowski M.: *Advanced course on structural mechanics* (in Polish), OWPW, Warszawa 1993.
- [6] Design of steel building with a handling system, located in Kielce (in Polish), designer: Michał Szczecina.

Urszula Pawlak
 Michał Szczecina

Zagadnienie własne w stateczności stalowej hali przemysłowej z transportem wewnętrznym

1. Wprowadzenie

Hale stalowe to typowe konstrukcje budownictwa przemysłowego. Obiekty te wznoszone są w stosunkowo krótkim czasie, a koszty ich budowy są niższe niż w przypadku hal murowanych. Znakomite właściwości wytrzymałościowe stali, zapewniające duże rozpiętości konstrukcyjne obiektu bez dodatkowych podpór, łatwość rozbudowy i adaptacji sprawiły, że budynki te coraz częściej wybierane są przez polskich inwestorów. Ponadto konstrukcje tego typu są estetyczne i podlegają procesom recyklingu, doskonale wpisując się we współczesny trend dbałości o środowisko naturalne.

Ogólną definicję hali stalowej można przedstawić w następujący sposób: halą stalową nazywamy budowlę parterową (najczęściej niepodpiwniczoną) jedno- lub wielonawową charakteryzującą się brakiem przegród (ścian działowych) w obu kierunkach – podłużnym i poprzecznym w obrębie wnętrza obiektu (rys. 1). Zewnętrzne ściany oraz pokrycie dachowe służą do wyodrębnienia powierzchni użytkowej hali, a także zabezpieczają konstrukcję przed wpływem obciążeń wywołanych oddziaływaniem środowiska zewnętrznego, zapewniając konstrukcji sztywność. Konstrukcja stalowa hali sprawia, że jest ona stabilna oraz wytrzymała i odporna na warunki atmosferyczne.

Mimo tak licznych zalet tego typu ustrojów zdarzyły się ich awarie, a nawet katastrofy (Katowice, 2006), dlatego tak ważne jest prawidłowe projektowanie oraz wykonawstwo tego typu konstrukcji.

2. Słów kilka o halach przemysłowych z transportem wewnętrznym

Hale to budynki jednokondygnacyjne o różnorodnym przeznaczeniu. Można wyróżnić: hale przemysłowe (produkcyjne i magazynowe), hale obsługowe (hangary, zajezdnie, stacje obsługi), hale użyteczności publicznej (handlowe, wystawowe, sportowe, widowiskowe, dworcowe itp.).

Największą grupę stanowią hale przemysłowe. Powierzchnia stalowych obiektów przemysłowych

jest stosunkowo rozległa, dzięki czemu umożliwia realizację zadań związanych ze sprzedażą, przechowywaniem i sortowaniem produktów oraz ich produkcją. Budynki te mają najczęściej rzut prostokątny i powtarzalną konstrukcję złożoną z płaskich ustrojów nośnych stężonych poprzecznie. Występują w nich dodatkowo elementy związane z transportem wewnętrznym, takie jak belki suwnic podwieszonych lub natorowych, oraz konstrukcje pomocnicze, np. antresole, pomosty.

Suwnice, czyli dźwigi, potrzebne są do podnoszenia i opuszczania materiałów, ludzi, tzn. wspomagają i udoskonalają ich pracę (rys. 2). Suwnice mogą mieć długość prawie taką samą jak sam budynek. Urządzenia te pracują w pionie i w poziomie. Ich ogranicznikiem jest długość toru jazdy, wysokość na jaką można podnosić i opuszczać materiały oraz szerokość mostu. Obecnie można nawet stwierdzić, że bez suwnic przemysł i magazynowanie nie mogłyby istnieć. Szczególnie jeśli mamy na myśli przemysł ciężki, gdzie transportowane materiały są wielkogabarytowe i o znacznym ciężarze. Suwnice są zatem bardzo popularnymi i powszechnie stosowanymi urządzeniami w transporcie wewnętrznym hal przemysłowych.

3. Konstrukcja stalowa hali – stateczność to podstawa

W układzie konstrukcyjnym każdej hali można wyodrębnić główny ustrój nośny oraz konstrukcje wsparcze obudowy ścian i dachu hali stalowej. Głównym układem nośnym hali jest szkielet złożony z poprzecznych ustrojów nośnych (ram), połączonych ze sobą i usztywnionych stężeniami. Jego zadaniem jest zapewnienie wytrzymałości i stateczności elementom konstrukcji hali, a także sztywności niezbędnej przy spełnieniu żądanych warunków eksploatacji obiektu. Ramy nośne składają się z rygli (pełnościennych lub kratowych) oraz podpierających je słupów (pełnościennych lub kratowych). Każda konstrukcja nośna budynku musi spełniać warunki geometrycznej niezmienności ustroju w przestrzeni trójwymiarowej. Na budynek hali działają obciążenia pionowe (od ciężaru

własnego, suwnic, śniegu) oraz poziome, równoległe i prostopadłe do podłużnej osi obiektu (od wiatru, temperatury, suwnic). Układ nośny przenosi wielokierunkowe obciążenia działające na konstrukcję.

Podstawowym zagadnieniem związanym z układem konstrukcyjnym hali jest jego stateczność, która musi być zapewniona w warunkach realizacji, eksploatacji, przy rozbudowie, remontach i demontażu konstrukcji [3]. Stateczność konstrukcji to zdolność konstrukcji do zachowania niezmiennego położenia i kształtu pod wpływem działającego obciążenia. W przypadku hal stalowych pojęcie stateczności jest szczególnie ważne z uwagi na smukłość elementów nośnych, tj. ściskanych słupów. Występuje bowiem ryzyko nagłej utraty stateczności, w sytuacji gdy konstrukcje te są poddane dużym obciążeniom ściskającym. Utrata stateczności objawia się tym, że konstrukcja, np. słupek hali, ulega wyboczeniu (zaczyna nagle „wyginać się na wszystkie strony”) mimo, że nie działają na niego żadne (nawet niewielkie) siły boczne. By zapewnić właściwą i bezpieczną pracę, tj. by konstrukcja znajdowała się w stanie równowagi statecznej, należy określić jej wartości (obciążenie krytyczne) i wektory własne (postaci wyboczenia).

4. Zagadnienie własne w stateczności stalowej hali przemysłowej z transportem wewnętrznym

Analizie stateczności poddano stalową halę przemysłową przedstawioną w przekroju na rysunku 3 oraz w aksonometrii na rysunku 4.

Rozważana hala wykonana została w konstrukcji stalowej oraz posadowiona na żelbetowych stopach fundamentowych. Hala zlokalizowana jest w Kielcach, w 1-szej strefie obciążenia wiatrem oraz 3-ciej strefie obciążenia śniegiem. Grunt w poziomie posadowienia stanowiły gliny piaszczyste o stopniu plastyczności $IL = 0,2$. Poziom posadowienia przyjęto 1 m poniżej poziomu terenu.

Główny układ konstrukcyjny hali to stalowa rama płaska, jednonawowa, jednopiętrowa z dachem jednospadowym oraz z krótkimi wspornikami, na których wsparte zostały belki podsuwnicowe. Połączenie słupów z fundamentami zrealizowano jako pełne utwierdzenie, natomiast połączenie ryglu dachowego ze słupem jako przegubowe. Rozpiętość osiowa układu wynosi 12 m, a wysokość konstrukcji najwyższego punktu dachu wynosi 7,8 m. Rygiel ramy to pełnościenny kształtownik IPE 400, zaś słupek – pełnościenny HEB 320. Belki podsuwnicowe oparte zostały na krótkim wsporniku stalowym, połączonym sztywno z trzonem słupa stalowego. Wspornik stalowy wyko-

nano jako element blachownicowy o zmiennej wysokości.

Połączenie krótkiego wspornika z trzonem słupa zrealizowano jako spawane za pomocą spoin pachwinowych i dodatkowo wzmocniono węzeł żebrami. Połączenie ryglu dachowego ze słupem wykonano jako śrubowe.

Układ przestrzenny hali stanowią wspomniane wyżej układy płaskie w ilości 5 sztuk, w rozstawie 6 m. Konstrukcję przekrycia hali wykonano z blachy trapezowej, ułożonej na stalowych płatwiach z kształtownika IPE 200 w rozstawie co 2,4 m. W płaszczyźnie dachu w skrajnych polach wykonano stężenia dachowe z prętów stalowych średnicy 20 mm. Wszystkie połączenia elementów konstrukcji dachu zrealizowano jako śrubowe, zaś blachę trapezową zamocowano na wkręty samowierzące.

Ściany boczne i szczytowe hali wykonano z płyt warstwowych, mocowanych do stalowej ryglówki. W skrajnych polach wykonano stężenia ściennie z kątownika równoramiennego 80 x 80 x 6.

Belkę podsuwnicową zrealizowano jako pełnościenną z profilu HEA300. Tory jezdne suwnicy zabezpieczono kozłami odbojowymi. Zamontowana w hali suwnica natorowa ZXJ o całkowitym udźwigu 50 kN, porusza się z prędkością 40 m/min. Prędkość jazdy wózka wynosi 30 m/min, a prędkość podnoszenia 12,5 m/min.

Całość konstrukcji stalowej wykonano ze stali klasy S235JR, a stopy fundamentowe z betonu klasy C30/37 zbrojonego stalą RB500W.

4.1. Istota zagadnienia – zagadnienie własne w stateczności konstrukcji

Najmniejszą wartość obciążenia odpowiadającą utracie stateczności nazywamy obciążeniem krytycznym. Jego wartość zależy od konstrukcyjnego ukształtowania elementu, np. długości elementu, kształtu i wymiarów przekroju poprzecznego, sposobu podparcia. Postać wyboczenia, tzn. odkształconą postać konstrukcji pod wpływem obciążenia krytycznego obrazuje wektor własny. Pod pojęciem zagadnienie własne rozumiemy wyznaczenie wartości własnych i odpowiadających im wektorów.

W pracy zagadnienie własne rozwiązane zostało przy użyciu MES. Wartości własne σ_* określono, korzystając z równania (1) wyrażającego krytyczny stan równowagi analizowanego układu [5].

Wektory własne $\delta\sigma_*$ wyznaczono z równania (2), co wskazuje, że w krytycznym stanie układu możliwe są różne położenia jego równowagi.

Wektor własny opisany równie (3) określa postać utraty stateczności układu.

4.2. Zagadnienie własne w stateczności stalowej hali przemysłowej z transportem wewnętrznym – analiza

Analizę stateczności przedmiotowej hali przeprowadzono z wykorzystaniem programu Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014, opartego na MES. Schemat statyczny pojedynczego układu poprzecznego hali przyjęto jak na rysunku 5. Poszczególne układy poprzeczne zostały połączone w drugim kierunku za pomocą stężeń, płatwi i belki podsuwnicowej.

Jako typ analizy przyjęto w programie Robot „Wyboczenie”. Słupy zostały obciążone jednostkową siłą, a jako wynik obliczeń program zwrócił m.in. mnożnik zadanego obciążenia. Mnożnik ten jest równoważny z siłą krytyczną wyrażoną w kN. Słupy zostały zamodelowane z różnym stopniem podziału na liczbę elementów skończonych, a mianowicie na 1, 3 oraz 5 elementów. W ten sposób możliwe było przeprowadzenie analizy zmienności wyników zależnie od stopnia dyskretyzacji elementów ściskanych.

Poniżej zestawiono, w formie tabelarycznej oraz w postaci rysunków, wyniki obliczeń dotyczące wartości sił krytycznych oraz postaci wyboczenia i wektorów własnych dla pierwszych czterech wartości własnych. Zależność kolejnych wartości sił krytycznych od stopnia dyskretyzacji słupów przedstawia tabela 1.

Na podstawie powyższych wyników można zauważyć, że wraz z rosnącą liczbą podziału słupa na elementy skończone wartości poszczególnych sił krytycznych dążą do wartości ściślejszej (dokładnej). Dlatego też postacie wyboczenia pokazano przy podziale słupów na pięć elementów skończonych. Postacie te zebrane są na rysunkach od 6 do 9. Dla najbardziej interesującej projektanta pierwszej wartości siły krytycznej postać wyboczenia ma charakter przechyłowy.

Dla zaprezentowanych postaci wyboczenia w tabelach od 2 do 5 podano wartości przemieszczeń węzłowych odpowiadających wektorom własnym. Przemieszczenia liniowe UX i UZ wyrażone są w centymetrach, a kąt RY obrotu węzła podano w radianach. Numery węzłów i układ osi przyjęto jak na rysunku 5.

5. Wnioski

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że w przypadku specyficznej konstrukcji układu poprzecznego hali z transportem wewnętrznym, dominująca jest przechyłowa postać utraty stateczności.

Stopień dyskretyzacji ma wpływ na uzyskane wartości sił krytycznych, przy czym wpływ ten ujawnia się szczególnie dla drugiej i kolejnych wartości sił krytycznych. Z kolei relatywnie niska wartość pierwszej siły krytycznej (2167 kN) pozwala stwierdzić, że problemy związane ze statecznością będą jednymi z najważniejszych podczas projektowania konstrukcji układu poprzecznego hali z transportem wewnętrznym. Podczas eksploatacji hali należy natomiast unikać niepotrzebnego przeciążania ustroju nośnego, szczególnie poprzez nieprzestrzeganie dopuszczalnego udźwigu suwnicy.